

変動空気圧により地盤内に生じる間隙空気圧と有効応力の変動

桑 原 久 実*・玉 井 佐 一**

1. 緒 言

風による砂の流送現象を飛砂と言い、主に海岸工学、農業工学の立場からその機構の解明と災害の防止について研究されてきた。風による砂の移動形態は、浮遊、跳躍、掃流であり、その中でも跳躍によるものが多いと言われている。砂の初期移動機構は、Bagnold (1954)、河村 (1951) の衝突論、Ishihara and Iwagaki (1952) の掃流論、内田 (1948) の揚力論によるものが示され、飛砂量の算定法については、種々の移動理論に基づいて提案されている。また、砂面が湿潤状態にある場合については、河田・土屋 (1976)、堀川ら (1984) により種々検討されている。このような数多くの研究により有益な知見が得られているが、依然として多くの問題点を残しているようである。

最近、波浪による変動水圧が海底地盤に作用することにより、地盤内に過剰間隙水圧が発生し、地盤が液状化することが示されている (例えば、善ら, 1987)。この地盤に発生する液状化が、砂の移動機構に大きな影響を与えていることが明らかにされつつある。

水と空気では砂に対する比重が大きく異なるが、飛砂の移動機構についても、同じ様な現象が生じているものと思われる。すなわち、変動空気圧の作用により地盤内の間隙空気圧および有効応力が変動し、有効応力がゼロになる場合、砂粒子は空気中に浮いた状態になり、わずかな外力によって容易に移動すると考えられるのである。

このようなことから、飛砂に関する従来の研究と観点を変えて、風速、風向の変動により地表面に生じる変動空気圧が、地盤の安定性に与える影響について、土質力学的な面から検討することにした。ここでは、主に変動空気圧の作用により地盤内に生じる間隙空気圧および有効応力の変動について、実験及び理論的に検討を進めている。

2. 理論解析の概要

変動空気圧の作用下にある乾燥した地盤の挙動を示す

基礎式は以下のように求められる。

図—1 は、解析に使用した鉛直 1 次元地盤モデルである。不透気性地盤上に深さ D の均一地盤があり、その表面に変動空気圧が作用するものとする。

図中ハッチで示してある地盤の微小体積 $\Delta V = \Delta Y A$ において、流体は次の連続式を満たす。

$$\frac{\partial(\rho_a n_a \Delta Y A)}{\partial t} = -\frac{\partial(\rho_a V A)}{\partial Y} \Delta Y \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 ρ_a : 空気の密度、 n_a : 空気の含有率 (乾燥砂であるから間隙は空気で満たされている)、 V : Y 方向の流速である。

(1) 式の左辺は次式のようになる。

$$\frac{\partial(\rho_a n_a \Delta Y A)}{\partial t} = \left(n_a \Delta Y \frac{\partial \rho_a}{\partial t} + \rho_a \Delta Y \frac{\partial n_a}{\partial t} + \rho_a n_a \frac{\partial \Delta Y}{\partial t} \right) A \quad \dots\dots\dots (2)$$

地盤の微小体積の高さ ΔY は、鉛直方向の有効応力 σ'_y によって Hooke の法則に従い、次式のように変化する。

$$\frac{\partial \Delta Y}{\partial t} = -m_v Y \frac{\partial \sigma'_y}{\partial t} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 m_v : 地盤の圧縮率である。

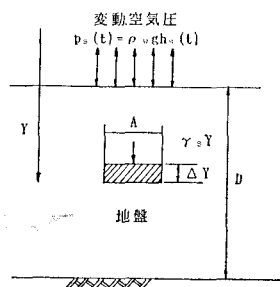
地盤の構成材料実質の体積変化は無視できるとすると、

$$(1 - n_a) \Delta Y A = \text{一定} \quad \dots\dots\dots (4)$$

となり、(4) 式を時間 t で微分し (3) 式を代入すると、次式が得られる。

$$\frac{\partial n_a}{\partial t} = -(1 - n_a) m_v \frac{\partial \sigma'_y}{\partial t} \quad \dots\dots\dots (5)$$

地盤の慣性力を無視できるものとし、上載荷重が有効応



図—1 解析モデル

* 正会員 農博 高知大学大学院 研究生

** 正会員 工博 高知大学教授 農学部農業工学科

力と間隙空気圧で均り合うとすると、次式が示される。

$$\sigma'_Y + p_m = \gamma_s Y + p_s \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 γ_s : 地盤の単位体積重量, p_m : 変動間隙空気圧, p_s : 地盤表面の変動空気圧である。

(6)式の p_m 及び γ_s は、次式で表される。

$$p_m = \rho_w g h_m = \rho_w g h_s + \rho_a g Y + \rho_w g h_e \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$\gamma_s = \rho_s g (1 - n_a) + \rho_a g n_a \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここに、 h_m, h_s, h_e : それぞれ、変動間隙空気圧、地盤表面の変動空気圧、変動過剰間隙空気圧の水頭表示, g : 重力加速度である。

(7), (8)式を(6)式に代入すると次式が得られる。

$$\sigma'_Y + \rho_w g h_e = g Y (\rho_s - \rho_a) (1 - n_a) \quad \dots\dots\dots (9)$$

(9)式を時間 t で微分すると次式が得られる。

$$\rho_w g \frac{\partial h_e}{\partial t} = - \frac{\partial \sigma'_Y}{\partial t} \quad \dots\dots\dots (10)$$

(3)式と(10)式より次式が得られる。

$$\frac{\partial \Delta Y}{\partial t} = m_v \Delta Y \rho_w g \frac{\partial h_e}{\partial t} \quad \dots\dots\dots (11)$$

また、(5)式と(10)式より次式が得られる。

$$\frac{\partial n_a}{\partial t} = (1 - n_a) m_v \rho_w g \quad \dots\dots\dots (12)$$

(2)式右辺の第1項目にある $\partial \rho_a / \partial t$ は、次式の Boyle の法則から、

$$\rho_a = \rho_{a0} (P / P_0) \quad \dots\dots\dots (13)$$

ここに、 ρ_{a0} : 大気圧 (P_0) のもとでの空気密度, P : 絶対空気圧 ($= P_0 + p_m$, p_m : 変動間隙空気圧) である。

次式のようになる。

$$\frac{\partial \rho_a}{\partial t} = \frac{\rho_{a0}}{P_0} \rho_w g \frac{\partial h_m}{\partial t} \quad \dots\dots\dots (14)$$

(12), (13) 及び (14) 式を(2)式に代入すると次式のように

(1)式の左辺が求められる。

$$\frac{\partial (\rho_a n_a \Delta Y A)}{\partial t} = \left\{ n_a \Delta Y \frac{\rho_{a0}}{P_0} \rho_w g \frac{\partial h_m}{\partial t} + \rho_a \Delta Y m_v \rho_w g \frac{\partial h_e}{\partial t} \right\} A \quad \dots\dots\dots (15)$$

(1)式の右辺は次のようになる。

$$- \frac{\partial}{\partial Y} (\rho_a V A) \Delta Y = - \rho_a A \frac{\partial V}{\partial Y} \Delta Y \quad \dots\dots\dots (16)$$

(16)式の右辺に次式を代入すると、

$$V = - k_a \frac{\partial h_e}{\partial Y} \quad \dots\dots\dots (17)$$

ここに、 k_a : 透気係数 ($= \mu_w k_w / \mu_a$, k_w : 水の透気係数, μ_a, μ_w : 空気, 水の粘性係数) である。

(18)式が得られる。

$$- \frac{\partial}{\partial Y} (\rho_a V A) \Delta Y = \rho_a A k_a \frac{\partial^2 h_e}{\partial Y^2} \Delta Y \quad \dots\dots\dots (18)$$

ここで、変動間隙空気圧が次式で表されるものとする、

$$h_m = h_s + \rho_a / \rho_w Y + h_e \quad \dots\dots\dots (19)$$

(1) 式より (15) 式と (18) 式は等しいので、基礎式は次式のように求められる。

$$\rho_a k_a \frac{\partial^2 h_e}{\partial Y^2} = n_a \frac{\rho_{a0}}{P_0} \rho_w g \frac{\partial h_s}{\partial Y} + \left\{ n_a \frac{\rho_{a0}}{P_0} \rho_w g + \rho_a m_v \rho_w g \right\} \frac{\partial h_e}{\partial Y} \quad \dots\dots\dots (20)$$

変動空気圧による地盤の流動化は、次式の条件を満たす地盤深さまで生じることになる。

$$\sigma'_Y = \gamma_s Y + p_s - p_m \leq 0 \quad \dots\dots\dots (21)$$

初期条件および境界条件は次のようになる。

$$\left. \begin{array}{l} t=0 \text{ で, } h_e=0 \\ Y=0 \text{ で, } h_e=0 \\ Y=D \text{ で, } \partial h_e / \partial Y=0 \end{array} \right\} \quad \dots\dots\dots (22)$$

変動過剰間隙空気圧 h_e は、(20)式に(22)式の条件を用いて、差分法により容易に計算することができる。

3. 実験の概要

図-2 は実験装置の概要を示している。実験は高さ 82.4 cm, 幅 49.8 cm, 奥行き 21.7 cm の片面透明塩ビ板 (厚さ=0.5 cm) による木製の箱 (木板の厚さ=1.2 cm) を、図のように内部を上下から仕切り 3 槽に分けたものを使用している。右槽は高さ 50 cm まで砂を入れ、背面には圧力センサー (共和電業, PGM-02KG) を設置し、間隙空気圧を測定できるようにしてある。圧力センサー受圧面 (直径=1.0 cm) に直接土圧が作用しないようにフィルター (約 0.5 mm メッシュのガーゼ) を設け、フィルターと受圧面の距離は約 5 mm である。中央と左槽は U 字管に成っており、左槽にピストンを挿入し、空気出入孔を開けた状態で水を入れ水深 h_1 とする。その後、空気出入孔を閉め、ピストンを上昇させると左槽の水位が h_2 となり、この水位差 (Δh) により生じる圧力が中央と右槽の空気を介して右槽の砂地盤表面に作用する。この際、急速にピストンを上昇させると中央と左槽の水に振

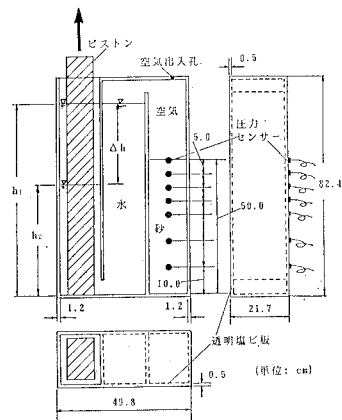


図-2 実験装置の概要

動が生じ、砂地盤表面の変動空気圧は減圧、加圧を繰り返す、減衰を伴いながらピストンの上昇によって得られる一定圧力となる。測定は、AD 変換器を通じてパソコンで行い、サンプリングタイムは 0.002 sec とした。また、変動空気圧の作用により地盤内に生じる流動化深さを見るために、右槽の砂面上に 50.0 g の分銅を設置し、ピストンを所定の速度 (表-1 を参照) により 7 秒間隔で 50 回変動空気圧を作用させた後、分銅の沈下深さを測定した。

表-1 変動空気圧の特性

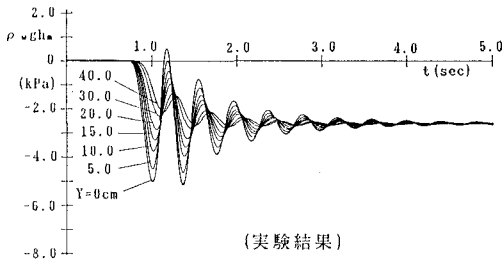
Case	$\Delta h (=h_1-h_2)$ (cm)	変動空気圧の減圧 速度 (kPa/sec)	変動空気圧の増圧 速度 (kPa/sec)
1	29.3	11.7	1.47
2	41.1	14.6	1.47
3	29.3	1.08	1.47

4. 実験および解析条件

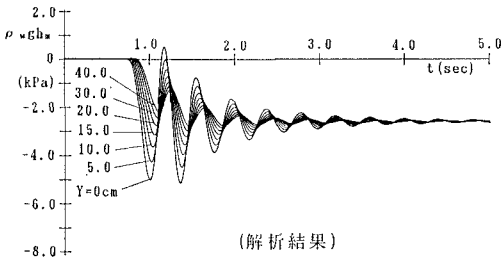
表-1 は、変動空気圧による地盤の応答特性を検討するために用いた実験条件を示している。変動空気圧の大

表-2 地盤の物性定数

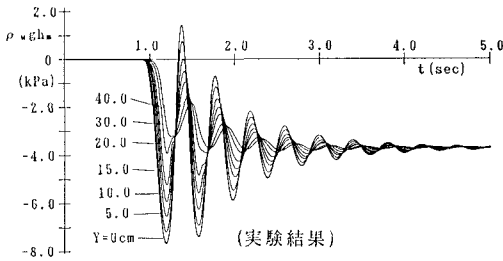
※ 中央粒径 (d_{50})	0.25mm
※ 土粒子の密度 (ρ_s)	$2.65 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
水の密度 (ρ_w)	$1.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
空気密度 (ρ_{a0})	1.21 kg/m^3
※ 透水係数 (k_w)	0.00025mm/sec
水の粘性係数 (μ_w)	$1.002 \times 10^{-3} \text{ kg/m} \cdot \text{sec}$
空気の粘性係数 (μ_a)	$1.81 \times 10^{-5} \text{ kg/m} \cdot \text{sec}$
透気係数 (k_a)	0.014m/sec
※ 間隙率 n (=空気含有率 n_a)	0.45
地盤の圧縮率 (m_v)	$1.0 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{N}$
大気圧 (P_0)	760mmHg



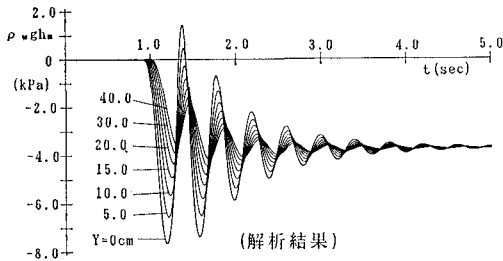
(a) case 1



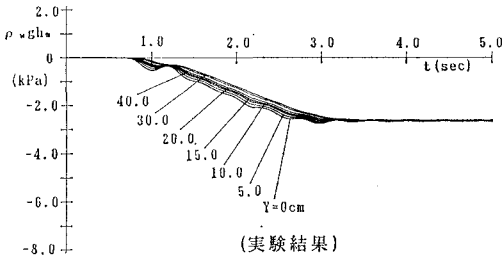
(a) case 1



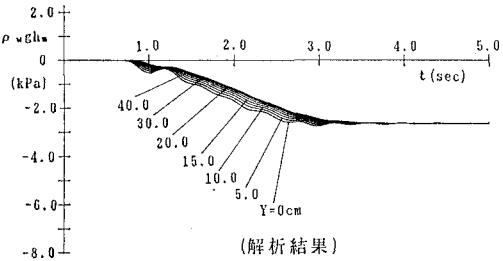
(b) case 2



(b) case 2



(c) case 3



(c) case 3

図-3 変動空気圧による間隙空気圧の変動特性

きさ、速さを変化させている。また、表-2 は地盤の物性定数である。表中の※は実験によって得られた値であり、他の物性値は砂地盤であることを考慮し、種々の文献を参考にして値を決めた。

(22)式の基礎式は差分法を用いて解いたが、この際の空間、時間メッシュは $\Delta Y=5\text{ cm}$ 、 $\Delta t=0.002\text{ sec}$ である。

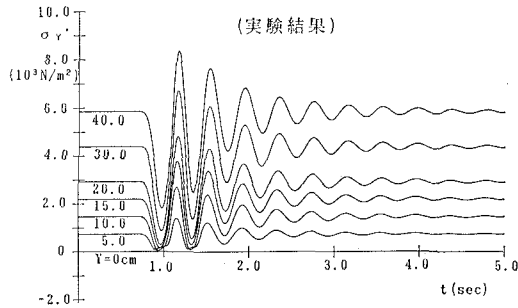
5. 結果及び考察

(1) 変動間隙空気圧

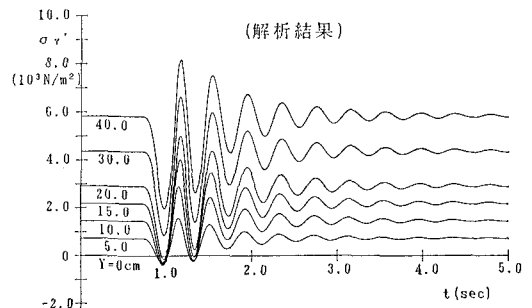
図-3 は、地表面の変動空気圧により地盤内に生じる変動間隙空気圧の伝播特性について示している。(a)~(c) は、表-1 に示した case 1~3 によるものである。それぞれの図の左は実験結果、右は解析結果を示してい

る。いずれの図も縦軸は変動間隙空気圧 ($\rho_{wg}gh_m$) をとり、横軸は経過時間 (t) をとっている。

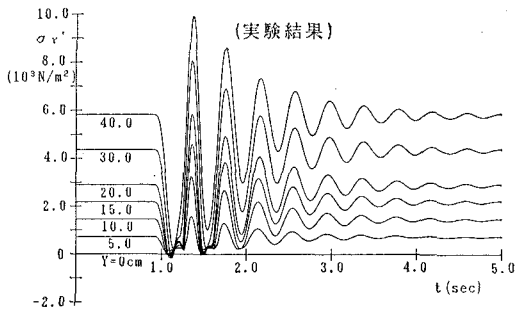
(a) によると、地盤表面 ($Y=0$) に作用する変動空気圧は上述したように振動を伴いながら減衰し一定圧力になっている。地盤内の間隙空気圧は地表面空気圧の変動と同様な傾向を示しているが、地盤内に入るに従い減衰し、位相差を増加しながら伝播している。(b) のように大きな変動空気圧が作用すると、間隙空気圧は大きく変動し地盤の深い位置まで達している。また、実験値において、僅かな波形の歪みが認められるが、地盤の流動化が影響したものと考えられる。(c) のように変動空気圧をゆっくり作用すると、地盤内の間隙空気圧は減衰、位相差があまり生じないため、地盤表面の変動空気圧とほとんど



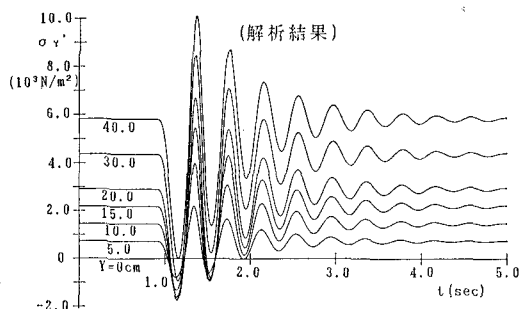
(a) case 1



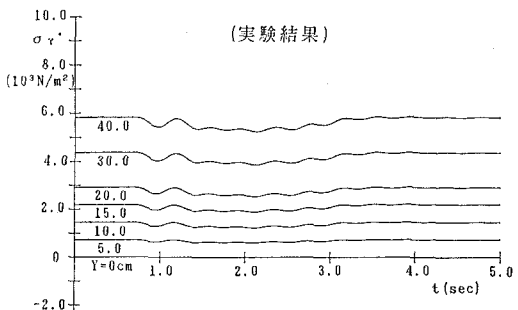
(a) case 1



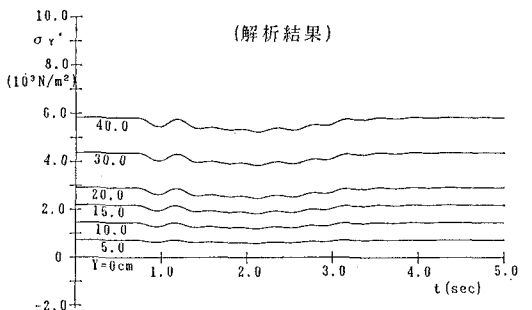
(b) case 2



(b) case 2



(c) case 3



(c) case 3

図-4 変動空気圧による有効応力の変動特性

同じ変動を示している。

変動間隙空気圧について、実験結果と解析結果を比較すると、いずれの場合もよく一致していることがわかる。

(2) 変動有効応力

図-4 は、地表面の変動空気圧により地盤内に生じる有効応力の変動特性について示している。(a)~(c) は case 1~3 に対応している。いずれの図も縦軸は有効応力(σ_v)をとり、横軸は経過時間(t)をとっている。

(a)によると、有効応力は、地盤表面の空気圧が地盤内の間隙空気圧より低いと減少し、その逆に地盤表面の空気圧が地盤内の間隙空気圧より高いと増加していることがわかる。実験値の場合、有効応力がゼロに近づくと理論値のような滑らかな変動波形ではなく少し歪んだものとなっている。これは、地盤が流動化したために生じたものと考えられる。解析値では、 $t=0.10$ sec 当りで地盤深さ $Y=20.0$ cm 程度まで、有効応力は 0 以下となり地盤が流動化していることがわかる。(b)のように大きな変動空気圧が作用すると、有効応力は地盤の深い所まで大きな変動を示し、解析値では $t=0.12$ sec 当りで $Y=40.0$ cm 程度まで有効応力は 0 以下となり、(a)の場合より流動化深さは大きくなっている。また、実験値の変動は、有効応力がゼロに近づくと大きく歪んだものとなっている。また、(c)のように変動空気圧をゆっくり作用すると、地盤表面の変動空気圧が減衰、位相差を伴わないで地盤内を伝播するため、地盤内に過剰間隙空気圧が発生せず有効応力はほとんど変化しないことがわかる。

実験中、変動空気圧の作用による砂の動きを観察したところ、case 1, 2 では変動空気圧の作用直後に砂層の上部が 2~3 回上下に移動し、流動現象が生じていることが認められた。これは、有効応力が 0 以下となった時、その時刻の間隙空気圧の勾配によって生じる物体力により砂粒子が移動したものと考えられる。分銅の沈下深さは、case 1 で 3.4 cm, case 2 で 15.2 cm, case 3 で 0.2 cm を示し、変動空気圧の減圧量、減圧速度が大きいほど流動化が大きく発生していることがわかった。

図-4 に示した有効応力の変動についても、実験結果

と解析結果はよく一致していることが認められる。

6. 結 言

飛砂現象を解明するため、ここでは従来の研究と観点を変え、風向、風速の変動により地表面に作用する変動空気圧が地盤の安定性に及ぼす影響について土質力学的に検討した結果、次のことが明らかになった。

- 1) 地盤内の変動間隙空気圧は地表面の変動圧と同様な傾向を示すが、地盤内に入るに従い減衰し、位相差を増加させながら伝播する。
- 2) 変動空気圧の作用速度が遅いほど、変動間隙空気圧の減衰、位相差は表れなくなる。
- 3) 有効応力は、地盤表面の空気圧が地盤内の間隙空気圧より低いと減少し、その逆に地盤表面の空気圧が地盤内の間隙空気圧より高いと増加する。
- 4) 変動空気圧によって地盤が流動化することが、実験及び理論的に明らかとなった。
- 5) 変動空気圧の減圧量、減圧速度が大きいほど、地盤の流動化は大きく発生する。
- 6) 解析結果と実験結果はよく一致しており、本研究で示した解析手法は変動空気圧の作用下にある地盤の挙動をよく表していると考えられる。

参 考 文 献

- 内田茂男 (1948): 砂粒の飛出し風速に関する一つの解析, 治山事業参考資料第 1 報, 林野局, pp. 45-56.
- 河田恵昭・土屋義人 (1976): 飛砂における砂粒の移動限界と飛砂量に及ぼす含水比の影響, 土木学会論文報告集, No. 249, pp. 95-110.
- 河村竜馬 (1951): 飛砂の研究, 東京大学理工学研究所報告, 第 5 巻, pp. 95-112.
- 善 功企・山崎浩之・渡辺 篤 (1987): 海底地盤の波浪による液状化および高密度化, 港研報告, Vol. 26, No. 4, pp. 125-180.
- 堀川清司・堀田新太郎・久保田進・香取定和 (1984): 湿砂面上における飛砂についての研究, 第 31 回海岸工学講演会論文集, pp. 574-578.
- Bagnold, R. M. (1954): The Physics of Blown Sand and Desert Dunes, Methuen & Co. Ltd., London, 265pp.
- Ishihara, T. and Iwagaki, Y. (1952): On the effect of sand storm in controlling the mouth of the Kiku River, Bull. 2, Disaster Prevention Res. Inst., Kyoto Univ., pp. 1-33.